

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

特高矿化度采出液曝氧诱导盐—颗粒复合沉积及堵塞风险

齐红媛^{1,2,3}, 卫肖喧^{1,2}, 艾国生^{4,5}, 吴俊霖⁴, 韩国强⁴, 张波^{4,5}, 张新庆^{1,2}, 王玉龙^{1,2}

(¹ 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065; ² 西安石油大学陕西省油气田特种增产技术重点实验室, 陕西 西安 710065; ³ 油气储运安全与节能陕西省高校工程研究中心, 陕西 西安 710065; ⁴ 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000; ⁵ 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 针对塔里木油田某区块特高矿化度采出液在集输过程中易发生管壁沉积并诱发堵塞风险的问题, 开展原水水质分析、静态曝氧实验、动态曝氧沉积实验和沉积物物相与微观结构表征, 研究曝氧条件下采出液盐—颗粒复合沉积行为及潜在堵塞风险。结果表明: 该采出液矿化度为 295491.39 mg/L, Na⁺和 Cl⁻为主导离子, Ca²⁺浓度较高, 表观 Zeta 电位接近零值, 颗粒体系稳定性较弱。静态曝氧过程中, HCO₃⁻由 160.18 mg/L 降至 21.85 mg/L, pH 由 5.78 升至 6.10, 悬固含量由 160.20 mg/L 增至 316.67 mg/L, 说明曝氧可促进碳酸盐平衡迁移、难溶盐沉淀生成及颗粒复合团聚。动态沉积实验表明, 不同管材表面沉积强度差异明显, 144 h 时钢骨架管沉积量最高, 为 7855.78 g·m⁻², 柔性复合管最低, 为 2879.63 g·m⁻²。综合表征结果表明, 沉积物中存在 NaCl 相关晶相信号、硅质颗粒及其他颗粒性固相, 并具有明显的多组分复合累积和内部非均质结构特征。综合认为, 敞口空气暴露引起的水化学变化、颗粒失稳、盐分富集、难溶盐固相形成及管壁捕获共同影响盐—颗粒复合沉积过程, 该过程可导致沉积物在管壁持续累积, 并进一步增加现场管道堵塞的潜在风险。研究结果可为特高矿化度采出液集输系统的管材优选、控氧、控颗粒和防堵治理提供依据。

关键词: 特高矿化度采出液; 曝氧; 盐—颗粒复合沉积; 结垢; 颗粒; 沉积; 管材表面性质

中图分类号: TE866

文献标志码: AA

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-12

Oxygen exposure of ultra-high salinity produced fluid induces salt-particle composite deposition and plugging risk

QI Hongyuan^{1,2,3}, WEI Xiaoxuan^{1,2}, AI Guosheng^{4,5}, WU Junlin⁴, HAN Guoqiang⁴, ZHANG Bo^{4,5}, ZHANG Xinqing^{1,2}, WANG Yulong^{1,2}

(¹ College of Petroleum Engineering, Xi'an petroleum University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; ² Shaanxi Key Laboratory of Advanced Stimulation Technology for Oil & Gas Reservoirs, Xi'an petroleum University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; ³ Shaanxi University Engineering Research Center for Safety and Energy Conservation of Oil and Gas Storage and Transportation, Xi'an 710065, Shaanxi, China; ⁴ PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, Xinjiang, China; ⁵ Research and Development Center for Exploration and Development Technology of Ultra-Deep Complex Oil and Gas Reservoirs, China National Petroleum Corporation, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Aiming at the problem that the ultra-high salinity produced liquid in a block of Tarim Oilfield is prone to

收稿日期: 2022-07-26 修回日期: 2022-08-25

通信作者: 齐红媛(1986-), 女, 博士, 副教授, 362882601@qq.com

第一作者: 齐红媛(1986-), 女, 博士, 副教授, 362882601@qq.com

基金项目: 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(25JR139)

引用本文: 齐红媛, 卫肖喧, 艾国生, 吴俊霖, 韩国强, 张波, 张新庆, 王玉龙. 特高矿化度采出液曝氧诱导盐—颗粒复合沉积及堵塞风险[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1–12

Citation: QI Hongyuan, WEI Xiaoxuan, AI Guosheng, WU Junlin, HAN Guoqiang, ZHANG Bo, ZHANG Xinqing, WANG Yulong. Oxygen exposure of ultra-high salinity produced fluid induces salt-particle composite deposition and plugging risk[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1–12

wall deposition and blockage risk during the gathering and transportation process, the raw water quality analysis, static oxygen exposure experiment, dynamic oxygen exposure deposition experiment and sediment phase and microstructure characterization were carried out to study the salt-particle composite deposition behavior and potential blockage mechanism of produced liquid under oxygen exposure conditions. The results show that the salinity of the produced liquid is 295491.39 mg / L, Na^+ and Cl^- are the dominant ions, the concentration of Ca^{2+} is high, the apparent Zeta potential is close to zero, and the stability of the particle system is weak. In the process of static oxygen exposure, HCO_3^- decreased from 160.18 mg / L to 21.85 mg / L, pH increased from 5.78 to 6.10, and suspended solid content increased from 160.20 mg / L to 316.67 mg / L, indicating that oxygen exposure could promote the equilibrium migration of carbonate, the formation of insoluble salt precipitation and the composite agglomeration of particles. The dynamic deposition experiment showed that the deposition strength of different pipe surfaces was significantly different. The deposition amount of steel skeleton pipe was the highest at 144 h, which was 7855.78 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, and that of flexible composite pipe was the lowest, which was 2879.63 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. The comprehensive characterization results show that there are NaCl-related crystal phase signals, siliceous particles and other granular solids in the sediments, and there are obvious multi-component composite accumulation and internal heterogeneous structural characteristics. It is concluded that the chemical changes of water, particle instability, salt enrichment, solid phase formation of insoluble salt and pipe wall capture caused by open air exposure jointly affect the salt-particle composite deposition process, which can lead to the continuous accumulation of sediments on the pipe wall and further increase the potential risk of on-site pipeline blockage. The research results can provide a basis for pipe optimization, oxygen control, particle control and anti-blocking treatment of ultra-high salinity produced liquid gathering and transportation system.

Keywords: ultra high salinity produced fluid; oxygen exposure; salt-particle composite deposition; scaling; particles; deposition; surface properties of pipe

引 言

气田采出液集输处理是气田开发过程中的关键工艺环节,其运行稳定性直接关系到气井连续生产、地面集输安全和气田开发效率^[1-3]。塔里木油田某区块气井采出液经分离器完成气液分离后,液相采出液进入高架沉降罐进行缓冲储存。受储层地质特征和现场开采工况影响,该区块采出液具有矿化度高、离子组成复杂、悬浮颗粒含量较高等特点,是影响集输系统长期稳定运行的重要水质因素^[4-9]。现场高架沉降罐多为敞口运行,采出液在罐内停留过程中与空气持续接触,可能引起 CO_2 逸散、pH 变化、碳酸盐平衡迁移、盐类沉淀和颗粒团聚等过程,进而诱发管壁沉积、设备结垢和管道堵塞。因此,明确特高矿化度采出液在曝氧条件下的盐-颗粒复合沉积过程及其潜在堵塞风险,对于气田集输系统防堵、缓堵和清堵具有重要意义。

针对油气田采出液结垢与堵塞问题,已有研究主要围绕水质结垢风险、悬浮颗粒稳定性、动态沉积行为及材料表面影响等方面展开。在水质结垢方面, CaCO_3 、 BaSO_4 、 SrSO_4 等难溶盐的沉淀倾向受

离子组成、pH、温度、压力和 CO_2 分压等因素控制,饱和指数和水质分析常被用于评价采出液潜在结垢风险^[10-14]。在颗粒稳定性方面,高矿化度环境会改变颗粒表面电性和双电层结构,削弱颗粒间静电排斥作用,使悬浮颗粒更易发生团聚、沉降和堵塞^[15-19]。在动态沉积方面,流动或扰动条件会影响盐类晶体和悬浮颗粒向壁面的迁移、碰撞与附着过程,使实际沉积行为与静态结垢预测结果存在差异^[20]。此外,管材表面粗糙度、润湿性、表面能和腐蚀状态等因素也会影响垢晶与颗粒在壁面的附着强度和沉积量^[21-23]。上述研究为认识油气田采出液结垢与堵塞问题提供了重要基础,也表明采出液堵塞过程受水化学条件、颗粒特性、流动扰动和壁面性质等多因素共同影响。

然而,现有研究仍存在一定不足。首先,已有研究多针对常规矿化度采出液或单一类型垢物,对特高矿化度采出液关注不足,难以充分反映高离子强度、弱酸性和颗粒低稳定性条件下的沉积特征。其次,现有研究多分别讨论结垢倾向、颗粒团聚或壁面沉积,对曝氧条件下水化学变化、颗粒失稳和动态沉积之间的连续作用过程认识不足。再次,静

态水质演化与动态管壁沉积之间的关联尚不清晰,缺乏基于现场实际采出液的系统实验验证。此外,不同管材在相同特高矿化度曝氧环境下的沉积差异及其表面控制因素研究仍较少,难以为现场管材优选和防堵治理提供直接依据。

鉴于此,本文以塔里木油田某区块现场特高矿化度采出液为研究对象,围绕高架沉降罐敞口空气暴露工况,开展原水水质分析、静态曝氧实验、动态曝氧沉积实验及沉积物表征。通过分析曝氧过程中离子浓度、pH、矿化度、表观 Zeta 电位、粒径中值和悬浮固体含量的变化,明确采出液水化学演化和颗粒稳定性变化规律;通过比较不同管材表面沉积量、表观平均沉积速率及沉积物物相组成、微观形貌和局部元素组成及内部非均质结构特征,揭示盐类沉淀、颗粒失稳和管壁附着共同控制下的盐—颗粒复合沉积过程。研究结果可为特高矿化度采出液集输系统的控氧、控颗粒、管材优选和潜在堵塞风险防控提供依据。

1 实验材料与方法

1.1 静态曝氧实验

实验水样取自塔里木油田某区块某井分离器后、高架沉降罐前液相管线出口。采样后,水样置于洁净密封容器中,在室温条件下保存,并于 24 h 内送至实验室测试。原水水质分析、静态曝氧实验和后续动态沉积实验均采用同一批现场采出液,以保证实验结果的可比性。

采出液理化性质分析参照《油田水分析方法》(SY/T 5523-2025)进行^[24]。采用离子色谱仪(ICS-2100, Thermo Scientific)测定主要阴、阳离子浓度;采用 pH 计(FE28, METTLER Toledo)和电导率仪(DDBJ-351L, 上海雷磁)分别测定 pH 和电导率;采用 Zeta 电位仪(Zetasizer Nano ZS90, Malvern)和激光粒度仪(Mastersizer 3000, Malvern)分别测定悬浮颗粒表观 Zeta 电位和粒径中值;采用重量法测定悬浮固体含量。矿化度根据主要阴、阳离子浓度计算得到。

为模拟现场高架沉降罐敞口运行工况,开展室温静态曝氧实验。本文静态曝氧实验包含曝氧短时外观观察和长周期水质监测两部分:取适量新鲜现场采出液置于洁净烧杯中,室温敞口自然曝氧 1.5 h,全程观察并记录水样颜色、底部沉淀和悬浮

物变化;另取足量现场采出液密封静置预处理后,敞口持续曝氧 20 d,分别采集初始、曝氧 10 d、曝氧 20 d 后的水样,测试各项理化指标,分析曝氧时长对采出液水质演化、颗粒稳定性的影响规律。本文所指“曝氧”核心为采出液由密闭集输体系转为敞口环境后,与空气接触引发的气液平衡重构过程,并非特指氧气主导的氧化反应。

1.2 动态曝氧沉积实验

为评价不同管材在动态扰动条件下的相对沉积倾向,开展动态曝氧沉积实验。选取钢骨架管^[25]、柔性复合管^[26]、塑料合金管、玻璃钢管、碳钢片和 PP 管 6 种材料制备试片。各类管材试片尺寸统一为 20 mm × 10 mm × 2 mm,实验前对试片进行清洗、干燥和称重,并记录其初始质量及有效沉积面积,以保证不同材料之间沉积量对比具有可比性。

动态曝氧装置如图 1 所示,由 750 mL 烧杯、IKA RW20 机械搅拌器、30 mm 搅拌桨和管材试片组成。实验采用 500 mL 现场采出液,在室温、敞口自然曝氧条件下连续进行。根据现场集输管道尺寸和流动参数估算管内表观剪切率^[27],并参考 Metzner - Otto 等效剪切率方法^[28-29],确定搅拌转速为 300 r/min,以形成稳定的动态扰动环境。实验过程中,将试片完全浸没于采出液中,并保持连续搅拌,使采出液处于动态扰动状态。

为提高沉积量测试结果的可靠性,每种管材在 48、96 和 144 h 三个取样时间下均设置 3 组平行试件,到达设定时间后取出对应试片,经轻微冲洗去除表面松散附着液滴后,烘干至恒重并称量,根据试片前后质量差和有效沉积面积计算单位面积沉积量。实验结果以 3 组平行实验的平均值表示,误差以标准差表示。

1.3 微观形貌与材料表面性质表征

采用 X 射线衍射(XRD, D8 Advance, 德国布鲁克公司)分析管材表面沉积物的晶态组成,用于识别沉积物中 NaCl、CaCO₃ 及其他可能存在的晶态组分。采用扫描电子显微镜(SEM, MA15, 卡尔蔡司显微图像有限公司)观察不同管材表面沉积物的微观形貌,重点分析颗粒团聚、晶体形貌、孔隙结构及沉积层附着特征,以明确复合沉积物的形貌结构。采用能谱分析仪(EDS, JED-2300, 日本 JEOL 公司)对沉积物典型区域进行元素组成分析,重点识别局部元素富集特征,用于识别代表性微区的局部元素组成及富集特征,为沉积物组分判断提供辅助依据。

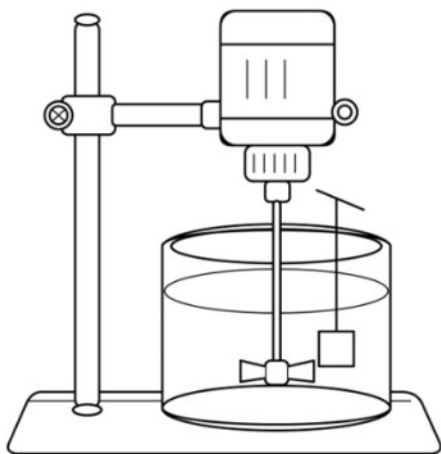


图1 曝氧动态沉积实验装置图

Fig.1 Experimental device diagram of oxygen exposure dynamic deposition

采用X射线CT扫描系统(Zeiss Xradia 510 Versa, 美国Zeiss公司)对代表性沉积物进行扫描和三维重构,用于表征其内部孔隙结构、致密区域及空间非均质特征。

为评价管材表面性质对沉积行为的影响,测试不同管材的水接触角、表面粗糙度和表面自由能,并分析其与单位面积沉积量之间的对应关系。水接触角用于表征管材表面亲疏水性,表面粗糙度以Ra表征,用于评价颗粒滞留和机械嵌合作用;表面自由能用于评价管材表面对盐—颗粒复合物的吸附倾向。由于测试样本数量有限,相关性分析主要用于判断不同表面参数与沉积量之间的变化趋势。

1.4 数据处理

为定量评价静态曝氧过程中采出液理化指标的变化规律,采用变化率表征各指标相对于初始值的变化幅度,计算公式(1)如下:

$$\eta = \frac{C_t - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, η 为变化率,%; C_0 为初始值; C_t 为曝氧时间 t 后的测试值。当 $\eta > 0$ 时表示该指标升高,当 $\eta < 0$ 时表示该指标降低。

动态沉积实验采用单位面积沉积量表征不同管材表面沉积强度,消除试片尺寸差异对实验结果的影响,计算公式(2)如下:

$$M_A = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (2)$$

式中, M_A 为单位面积沉积量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; m_0 为试片初始质量,g; m_t 为沉积后试片质量,g; A 为试片有效沉积面积, m^2 。本文试片所有外露表面均与采

出液充分接触,有效沉积面积统一按试片正面、反面及四个侧面的总外露面积计算。

单位面积平均沉积速率按式(3)计算:

$$R = \frac{M_A}{t} \quad (3)$$

式中, R 为单位面积平均沉积速率, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; M_A 为单位面积沉积量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; t 为沉积时间,h。该参数主要用于比较不同管材在相同实验条件下的平均沉积强度。

结垢热力学倾向采用饱和指数SI表征^[30]见式(4):

$$SI = \log_{10} \left(\frac{IAP}{K_{sp}} \right) \quad (4)$$

式中,IAP为离子活度积; K_{sp} 为矿物溶度积。当 $SI > 0$ 时,体系对相应矿物处于过饱和状态,具有沉淀析出趋势;当 $SI = 0$ 时,体系接近平衡状态;当 $SI < 0$ 时,体系未达到饱和状态,沉淀倾向较弱。

2 结果与讨论

2.1 静态曝氧实验

为揭示曝氧条件下高矿化度采出液的离子迁移、沉淀生成及颗粒演化规律,明确盐类结晶与悬浮颗粒间的相互作用机制,本节开展静态曝氧实验,系统分析不同曝氧周期下水样离子浓度、矿化度、pH、电导率及悬固含量等关键指标的动态变化,探究曝氧诱导水质物化转变及潜在堵塞物形成过程。

2.1.1 离子迁移与无机盐沉淀机制 1.5 h短时曝氧观察结果表明,初始采出液呈浅棕黄色,水体均匀,杂质含量少,底部无明显沉淀;短时曝氧后,水体颜色加深,底部沉淀和细小悬浮物增多,说明曝氧初期已引起采出液外观状态变化,可能与颗粒团聚、盐类局部析出及难溶沉淀生成有关。

某井水样初始及不同曝氧周期离子浓度和关键理化参数变化见表1。

如表1所示,初始水样矿化度为295491.39 mg/L,属于特高矿化度采出液; Cl^- 和 Na^+ 浓度分别为205324.09 mg/L和78254.10 mg/L,是液相主导离子,表明水样具有高NaCl含量特征。 Ca^{2+} 浓度为5542.05 mg/L,说明体系具有形成钙盐或碳酸盐沉淀的物质基础。原水pH为5.78,呈弱酸性。随曝氧时间延长,除 Ba^{2+} 外,多数离子浓度呈下降趋势。曝氧20 d后, Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 分别降低10.24%、

表1 某井水样初始和不同曝氧周期离子浓度及关键理化参数变化

Table 1 Changes of ion concentration and key physical and chemical parameters in initial and different oxygen exposure cycles of a well water sample

检测指标	初始	第10 d	第20 d
Na ⁺ / (mg/L)	78254.10	75034.30	70237.40
K ⁺ / (mg/L)	5614.50	5358.60	5024.54
Ca ²⁺ / (mg/L)	5542.05	5251.50	4933.34
Ba ²⁺ / (mg/L)	7.02	7.23	7.94
Sr ²⁺ / (mg/L)	272.10	266.50	254.86
Mg ²⁺ / (mg/L)	234.32	219.06	204.04
Cl ⁻ / (mg/L)	205324.09	198432.60	186835.10
SO ₄ ²⁻ / (mg/L)	75.21	73.41	70.23
HCO ₃ ⁻ / (mg/L)	160.18	102.35	21.85
矿化度 / (mg/L)	295491.39	284752.90	267597.91
pH	5.78	5.92	6.10

9.00%、10.98% 和 12.92%;矿化度由 295491.39 mg/L 降至 267597.91 mg/L,降幅为 9.44%;其中 HCO₃⁻ 变化最显著,由 160.18 mg/L 降至 21.85 mg/L,降幅达 86.36%;同时 pH 由 5.78 升至 6.10, Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 同步下降。

从水化学角度看,本文所称“曝氧”主要指采出液在敞口条件下与空气持续接触,并不特指 O₂ 单独参与的化学氧化反应。采出液由相对密闭的集输环境进入敞口沉降环境后,气液平衡重新建立,CO₂ 逸散可能导致水相中溶解 CO₂ 及碳酸组分减少,使 pH 升高并推动 HCO₃⁻/CO₃²⁻ 平衡向 CO₃²⁻ 方向迁移,从而促进 CaCO₃ 等难溶碳酸盐形成。HCO₃⁻ 显著降低、pH 升高以及 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 同步下降,也表明敞口空气暴露过程中可能伴随碳酸盐平衡迁移和固相生成。同时,高矿化度体系中的离子活度变化、局部浓缩、固液相再分配及溶解氧参与的局部氧化作用也可能共同影响水化学演化。因此,CO₂ 逸散可视为解释上述变化的重要机制之一,但并非唯一控制因素。Ba²⁺ 由 7.02 mg/L 升至 7.94 mg/L,可能与其初始浓度较低、测试波动或固液相再分配有关。总体而言,静态曝氧改变了采出液水化学环境,为后续饱和指数及颗粒稳定性分析提供了基础。

2.1.2 矿物结垢趋势分析 为进一步判断静态曝氧过程中主要无机盐的潜在沉淀趋势,基于不同曝氧阶段的离子浓度、pH 和矿化度等参数,根据式(4)估算 Calcite、Aragonite、Halite、Barite 和 Celestite 的表观饱和指数 SI,结果见表 2。饱和指数可用于评

价油田采出液中无机盐的潜在过饱和状态和沉淀倾向。

表2 不同曝氧阶段主要矿物表观饱和指数 SI

Table 2 The apparent saturation index SI of main minerals in different oxygen exposure stages

曝氧时间	SI- Calcite ^①	SI- Aragonite ^①	SI- Halite ^①	SI- Barite ^①	SI- Celestite ^①
初始值 ^②	0.49	0.35	-0.29	2.56	0.88
曝氧第10 d	0.41	0.27	-0.31	2.56	0.86
曝氧第20 d	-0.10	-0.24	-0.35	2.58	0.82

① SI-Calcite、SI-Aragonite、SI-Halite、SI-Barite 和 SI-Celestite 分别表示方解石型 CaCO₃、文石型 CaCO₃、NaCl、BaSO₄ 和 SrSO₄ 的表观饱和指数。

② 初始值为采出液未经曝氧处理时的测试与计算结果。

注:表中 SI 为基于现有水质数据计算得到的表观饱和指数,主要用于评价不同矿物结垢热力学倾向的相对变化,不作为实际沉淀量的定量表征。

由表 2 可知,Calcite 和 Aragonite 在初始值和曝氧第 10 d 时 SI 均大于 0,说明采出液对 CaCO₃ 具有一定过饱和特征,存在碳酸盐沉淀倾向;曝氧第 20 d 后,二者 SI 分别降至 -0.10 和 -0.24,表明液相中残余碳酸盐组分趋于近饱和或弱不饱和状态。该变化与前述 HCO₃⁻ 显著降低、Ca²⁺ 下降和悬浮固体含量升高相一致,说明曝氧过程中部分碳酸盐组分可能已发生沉淀消耗。Halite 的 SI 始终小于 0,说明从主体液相热力学平衡角度看,采出液中 NaCl 尚未达到明显过饱和状态。因此,不能仅依据 Na⁺ 和 Cl⁻ 浓度较高判断主体液相中已发生大量 NaCl 过饱和析晶。后续沉积物中检测到的 NaCl 信号,可能同时受到沉积层夹带高盐残液、局部盐分富集以及样品取出和干燥过程中残余液膜蒸发析晶等因素影响。由此可见,NaCl 更适合作为高盐体系中盐分富集和潜在析晶风险的表征,而不宜直接等同于现场流动环境下形成的稳定不可逆 NaCl 固相沉积。Barite 和 Celestite 的 SI 均大于 0,表明体系存在 BaSO₄ 和 SrSO₄ 的潜在沉淀风险,但由于 Ba²⁺ 和 Sr²⁺ 绝对浓度相对较低,其是否大量形成仍需结合 XRD、SEM-EDS 等固相表征结果进一步判断。

2.1.3 颗粒稳定性变化特征 前述离子变化和饱和指数结果表明,静态曝氧过程中采出液具有一定碳酸盐沉淀倾向,并可能伴随局部盐类析晶和硫酸盐结垢风险。在此基础上,进一步分析曝氧过程中

颗粒稳定性变化,以明确新生沉淀与悬浮颗粒复合团聚的可能性。水样电导率、Zeta 电位、粒径中值和悬固含量随曝氧时间的变化见表 3。

表 3 静态曝氧过程中颗粒稳定性相关参数变化
Table 3 Changes in parameters related to particle stability during static oxygen exposure

检测指标	初始	第 10 d	第 20 d
电导率 / (mS/cm)	189	182	176
Zeta 电位 / mV	1.84	1.82	1.81
粒径中值 / nm	3313	3125	3451
悬固含量 / (mg/L)	160.20	247.00	316.67

由表 3 可知,电导率由 189mS/cm 降至 176mS/cm,与矿化度及主要离子浓度下降趋势一致,说明液相中可溶离子总量降低,部分离子可能通过沉淀生成、颗粒吸附或固液转移进入固相。与此同时,表观 Zeta 电位始终维持在 1.81 ~ 1.84 mV,持续趋近于零值,受特高矿化度高离子强度影响,水体大量游离电解质离子可强烈压缩颗粒表面扩散双电层、产生电荷屏蔽效应,大幅压低 Zeta 电位绝对值,常规低盐体系的电位稳定阈值不适用于本研究体系。因此本文未将 Zeta 电位用于颗粒稳定性定量分级,仅作为颗粒界面静电状态的定性辅助判据。表观 Zeta 电位持续接近零值,表明在本实验高离子强度条件下颗粒间静电排斥作用较弱,体系处于较弱的静电稳定状态,具有发生颗粒聚集的可能性。

粒径中值由 3313 nm 变化至 3451 nm,整体维持在约 3 μm 的微米尺度。曝氧过程中粒径中值先降后升,可能与部分较大颗粒沉降、新生固相形成及颗粒二次团聚等过程共同有关。与此同时,悬浮固体含量由 160.20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 316.67 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,增幅达 97.67%,表明曝氧过程中固相含量明显增加。结合 HCO_3^- 显著降低、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度下降以及 pH 升高等结果,敞口空气暴露过程中可能伴随碳酸盐平衡迁移和难溶盐固相形成。新形成固相与原有悬浮颗粒可能共同参与颗粒复合团聚和固相累积过程。综合表观 Zeta 电位、粒径及悬浮固体变化可知,高离子强度条件下颗粒弱静电稳定状态与固相增加可能共同促进盐—颗粒复合悬浮体系的形成。

2.2 动态曝氧沉积实验

前述静态曝氧结果表明,曝氧过程可诱导采出水化学组成变化、颗粒稳定性降低和悬浮固体含量增加,说明体系中可能形成盐—颗粒复合悬浮体。在此基础上,为进一步明确盐—颗粒复合组分

在动态扰动条件下向不同管材表面的附着和沉积差异,开展不同管材表面动态曝氧沉积实验。实验设置 48 h、96 h 和 144 h 三个取样时间,每种管材、每个时间点均设置 3 组平行试验,结果以平均值表示。

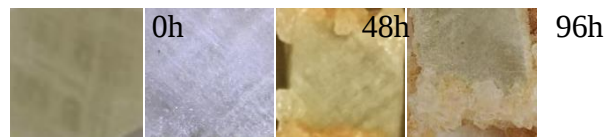
2.2.1 不同管材表面沉积量情况 不同管材表面沉积物宏观形貌见图 2,单位面积沉积量变化见图 3。

由图 2 可知,动态曝氧条件下不同管材表面均出现不同程度的沉积附着,且随时间延长逐渐增多。试片从采出液中取出时表面已可观察到晶体状、颗粒状或絮团状附着物,说明沉积并非完全由后续烘干过程造成,而是在液相曝氧和动态扰动过程中已发生颗粒捕获、难溶盐沉淀及固相附着。不同管材沉积程度差异明显,其中钢骨架管沉积最为突出,后期形成较厚且不均匀的覆盖层;碳钢片表面也出现明显块状或絮状沉积物。玻璃钢管和塑料合金管沉积程度居中,而柔性复合管和 PP 管表面沉积相对较少,说明其对盐分富集、颗粒团聚体和难溶沉淀的捕获与稳定附着能力较弱。

结合表 4 可知,不同管材沉积形貌差异与表面粗糙度、材料组成及润湿状态密切相关。其中,钢骨架管粗糙度最高, R_a 为 2.792 μm ,表面沉积物覆盖最为明显;柔性复合管和 PP 管表面较为平整, R_a 分别为 0.240 μm 和 0.201 μm ,表面沉积程度相对较低。说明粗糙表面的凹坑、沟槽及加工缺陷能够为悬浮颗粒和盐晶提供更多附着位置,并增强沉积层与管壁之间的机械嵌合作用,从而促进盐—颗粒复合物的捕获和稳定累积。

但沉积形貌并不完全由粗糙度单独决定。碳钢片 R_a 为 0.813 μm ,低于玻璃钢管和塑料合金管,但其表面沉积程度更高,可能与金属表面在动态曝氧和高矿化度条件下发生氧化或轻微腐蚀有关。氧化或腐蚀形成的非均质表面层可增加颗粒和盐晶附着位点,从而增强沉积倾向。玻璃钢管与塑料合金管粗糙度接近,沉积程度均处于中等水平,也说明材料基体和表面结构会共同影响沉积物附着。

从接触角和表面能来看,各管材润湿参数与沉积形貌之间未表现出简单对应关系。钢骨架管接触角最大、表面能最低,但沉积最明显;柔性复合管接触角较小、表面能较高,却沉积较少。说明接触角和表面能主要反映界面润湿状态,可作为判断沉积倾向的辅助参数,而不同管材表面盐—颗粒复合



(a) 玻璃钢管

(a) Fiberglass reinforced plastic pipe



(b) 碳钢片

(b) Carbon
steel coupon



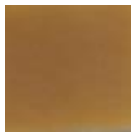
(c) 柔性复合管

(c) Flexible
composite pipe



(d) 钢骨架管

(d) Steel-
reinforced
pipe



(e) 塑料合金管

(e) Plastic alloy
pipe



(f) PP 管

(f) PP pipe

图2 不同管材表面沉积物宏观形貌

Fig.2 Macroscopic morphology of sediment on the surface of different pipes

沉积更主要受粗糙度、材料组成和表面化学状态共同控制。

2.2.2 不同管材表面沉积量变化规律 由图 3 可知,6 种管材表面的单位面积沉积量均随实验时间

表4 不同管材表面性质

Table 4 Surface properties of different pipes

管材	接触角 $/\text{°}$	粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	表面能 $/(m\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$
玻璃钢管	92.9	1.224	27.42
碳钢片	85.0	0.813	32.35
柔性复合管	76.9	0.240	36.88
钢骨架管	100.5	2.792	22.76
塑料合金管	93.8	1.236	26.88
PP管	91.2	0.201	35.80

延长而增加,说明在动态曝氧条件下,盐—颗粒复合沉积具有明显的时间累积特征。图中柱状图为3组平行实验平均值,误差棒表示标准差, $n=3$ 。各测试点标准差为 $2.15 \sim 146.68 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,说明平行实验结果具有较好的重复性,实验结果取平均值。为进一步比较不同管材的沉积强度,根据 144 h 平均单位面积沉积量计算表观平均沉积速率,结果见表 5。

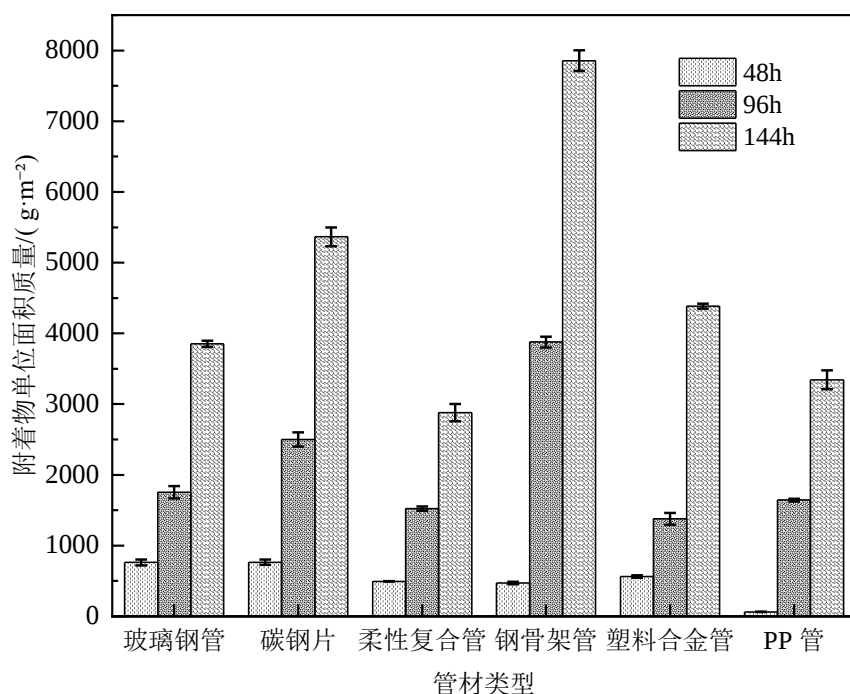


图3 不同管材表面单位面积沉积量变化

Fig.3 Variation of deposition per unit area on the surface of different pipes

表5 不同管材在动态曝氧条件下的表观平均沉积速率

Table 5 Apparent average deposition rate of different pipes under dynamic oxygen exposure conditions

管材	表观平均沉积速率 $/(g\cdot m^{-2}\cdot h^{-1})$
玻璃钢管	26.75
碳钢片	37.26
柔性复合管	20
钢骨架管	54.55
塑料合金管	30.45
PP管	23.22

由图3和表5可知,144 h时,不同管材单位面积沉积量由高到低依次为:钢骨架管>碳钢片>塑料合金管>玻璃钢管>PP管>柔性复合管。其中,钢骨架管沉积量最高,为 $7855.78 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,表观平均沉积速率为 $54.55 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;碳钢片沉积量次之,

为 $5365.28 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,表观平均沉积速率为 $37.26 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;柔性复合管沉积量最低,为 $2879.63 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,表观平均沉积速率为 $20.00 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。钢骨架管表观平均沉积速率约为柔性复合管的 2.73 倍,表明其在本实验条件下对盐—颗粒复合沉积物具有更强的捕获和累积能力。

从沉积过程看,不同管材沉积量增长幅度并不完全一致。钢骨架管在 48 h 时沉积量为 $470.95 \pm 19.23 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,96 h 和 144 h 时分别增加至 $3878.32 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $7855.78 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,表现出明显的后期快速累积特征,说明其表面一旦形成初始沉积层后,后续盐晶和颗粒更容易继续附着并累积。PP管也表现出类似的后期增长特征,由 48 h 的 $62.10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 增至 144 h 的 $3343.62 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,说明动态曝氧条件下沉积

过程可能存在由初始附着向沉积层快速累积转变的阶段特征。相比之下,柔性复合管在各阶段沉积量均处于较低水平,144 h 时沉积量仅为 $2879.63 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,说明其表面对复合沉积物的稳定附着能力相对较弱。

2.2.3 沉积物物相分析 为明确不同管材表面沉积物的晶态组成及物质来源,采用 X 射线衍射技术对不同管材表面附着物进行物相分析,结果见图 4。

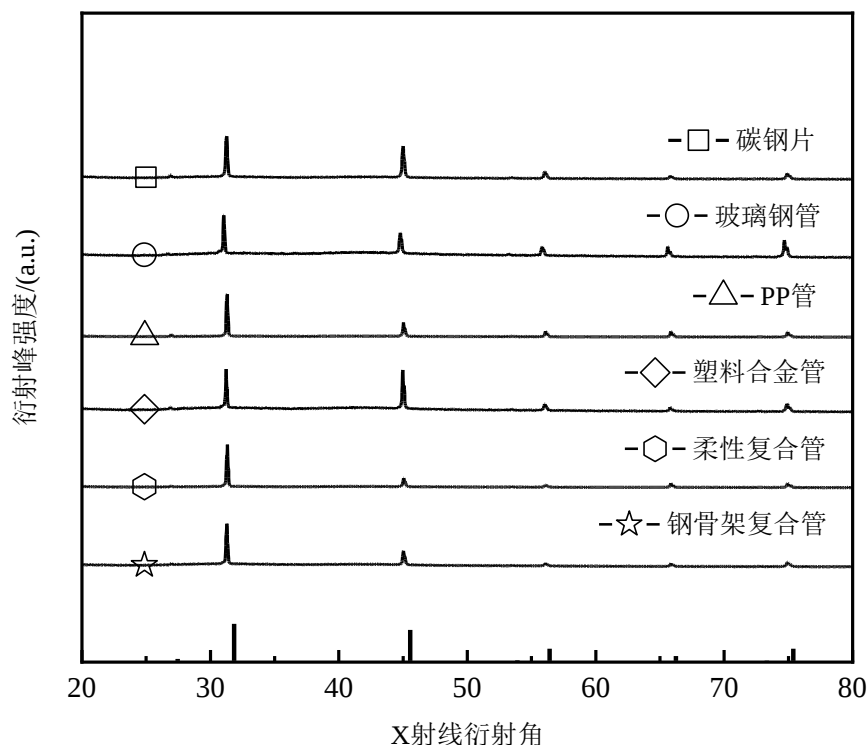


图4 不同管材表面附着物 XRD 物相分析结果

Fig.4 XRD phase analysis results of different tube surface attachments

由图 4 可知,不同管材表面附着物的主要衍射峰位置基本一致,表明其晶态组成具有一定共性。离线干燥沉积样品中 NaCl 衍射峰较为明显,说明样品中存在盐分富集或可溶盐析晶相关组分;部分样品中还可见碳酸盐相关晶相。金属管材沉积样品中还可见较弱的金属氧化物或腐蚀产物相关衍射信号。

结合前述 Halite 饱和指数始终小于 0 的结果,XRD 中检测到的 NaCl 不宜直接解释为现场流动条件下主体液相发生大量过饱和析晶。动态实验结束后,试片表面已存在晶体状、颗粒状或絮团状附着物,说明沉积并非完全由后续烘干造成;但沉积层孔隙及表面残留高盐液膜可能在干燥过程中进一步析出 NaCl,从而增强其衍射信号。因此,NaCl 相关信号更适合作为盐分富集、残液夹带及潜在析晶风险的综合表征,而不宜直接等同于现场条件下形成的稳定 NaCl 固相沉积。

此外,碳酸盐相关晶相可能与敞口空气暴露过程中 CO_2 逸散、pH 升高及碳酸盐平衡迁移有关,部分金属管材沉积物中还可见少量腐蚀产物相关信号。综合来看,不同管材表面沉积物具有盐分富集、难溶盐固相和颗粒性组分共同参与的多组分复合沉积特征。

2.2.4 复合沉积物形貌与结构特征 为进一步明确盐—颗粒复合沉积物的表面形貌、局部元素组成及内部结构特征,选取沉积程度较高、附着层较完整的钢骨架管表面沉积物作为代表性样品,采用 SEM-EDS 进行微观形貌和局部元素组成分析,并结合 CT 三维扫描对代表性沉积物的内部结构进行表征。

由 SEM 图像可知,管材表面沉积物并非均匀致密的单一盐垢层,而是呈现颗粒团聚、块状或片状附着物及局部层状堆积等多种形貌。部分区域可见颗粒堆积和相互嵌合,局部区域存在晶体状附着

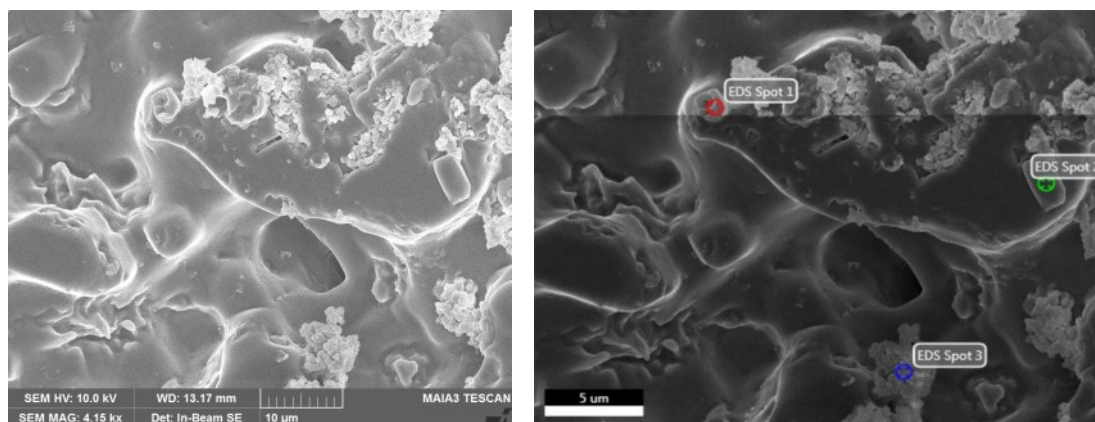


图5 钢骨架管表面沉积物 SEM 形貌及 Spot 1—Spot 3 EDS 点分析结果

Fig.5 SEM morphology of sediments on the surface of steel skeleton tube and Spot 1–Spot 3 EDS point analysis results

表6 典型表面沉积物代表性 SEM-EDS 元素组成

Table 6 Representative SEM-EDS elemental compositions of typical surface deposits

分析点位	主要元素组成(质量分数/%)
Spot 1	Cl 42.08、Na 40.95、O 5.60
Spot 2	Na 40.38、Cl 49.94
Spot 3	Si 61.48、O 38.52

物,说明沉积物形成过程中可能同时涉及悬浮颗粒捕获、盐分富集和固相附着等过程。EDS 代表性点位分析结果见表 6。Spot 1 和 Spot 2 均表现出明显

的 Na、Cl 富集特征,结合 XRD 结果,可推测其与 NaCl 相关组分或盐分富集区有关;Spot 3 主要表现为 Si、O 富集,说明该区域可能为 SiO_2 或硅质颗粒。综合 SEM 形貌、EDS 元素组成和 XRD 物相结果可知,沉积物中存在 Na、Cl 富集区、硅质颗粒及颗粒性固相,表明沉积物具有多组分复合累积特征。需要说明的是,EDS 点分析主要反映局部微区元素组成,不能单独确定沉积物整体物相。

为进一步获得沉积物内部三维结构信息,对代表性样品进行了 CT 扫描和三维重构,结果见图 6。

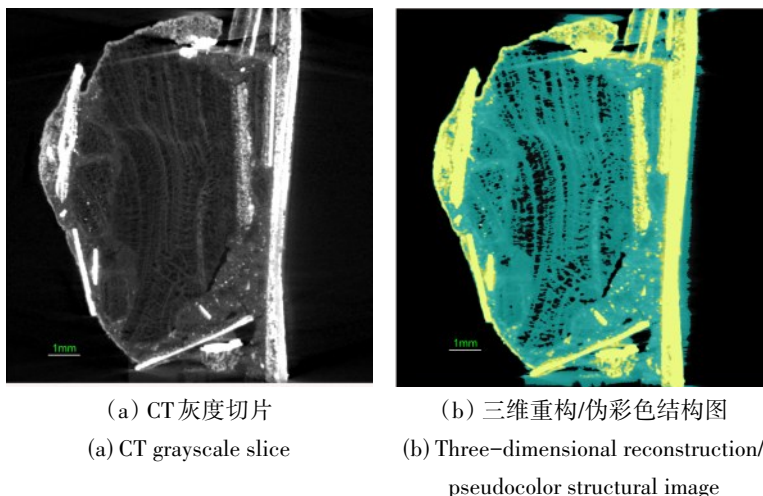
(a) CT 灰度切片
(a) CT grayscale slice(b) 三维重构/伪彩色结构图
(b) Three-dimensional reconstruction/
pseudocolor structural image

图6 代表性复合沉积物 CT 切片及三维重构结果

Fig.6 CT slice and three-dimensional reconstruction of representative composite deposits

由图 6 可知,沉积物内部呈现明显的空间非均质性,内部可识别出不规则孔隙、局部致密区以及不同 X 射线衰减特征的结构区域。灰度及伪彩色差异反映了样品内部不同位置在局部密度和 X 射线衰减能力上的差异,表明沉积物并非连续、均一致密

的单相固体,而是由不同致密程度的固相区域与孔隙结构共同构成。部分区域呈现较高致密度的连续或团块状结构,而其周围又分布有低密度孔隙和不规则间隙,显示出明显的多尺度非均质结构特征。CT 结果从三维尺度补充了 SEM 对颗粒团聚、

块状或片状附着及局部层状堆积等表面形貌的观察。

综上,SEM、EDS、XRD和CT从不同尺度表征了复合沉积物的组成与结构特征。XRD显示干燥样品中存在明显的NaCl相关晶相信号及少量其他晶态组分;SEM和EDS表明沉积物具有颗粒聚集、块状或片状附着及局部Na、Cl和Si、O富集特征;CT进一步揭示了内部孔隙区与局部致密区共存的非均质结构。综合来看,动态曝氧条件下形成的沉积物呈现盐分富集、颗粒聚集和多组分复合累积特征,其沉积程度受管材粗糙度、润湿性、材料组成及表面化学性质共同影响。钢骨架管和碳钢片沉积倾向较强,而柔性复合管和PP管相对较弱,且平行实验结果总体排序稳定。

3 结论

本文以塔里木油田某区块特高矿化度采出液为研究对象,围绕高架沉降罐敞口空气暴露工况下采出液水化学演化、颗粒稳定性变化及不同管材表面动态沉积行为开展实验研究,结合饱和指数分析、XRD和SEM-EDS及CT表征,分析了曝氧条件下盐—颗粒复合沉积机制及其潜在管壁堵塞风险,主要结论如下。

(1)静态曝氧实验表明,塔里木油田某区块采出液具有特高矿化度、 Na^+/Cl^- 主导和颗粒弱电稳定性特征。初始矿化度为 $295491.39\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Na^+ 和 Cl^- 为主导离子。曝氧20 d后, HCO_3^- 由 $160.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $21.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 同步下降,pH由5.78升至6.10,悬浮固体含量由 $160.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $316.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。表观Zeta电位始终接近零值,说明特高矿化度环境下颗粒间静电排斥作用较弱,颗粒体系处于弱稳定状态。上述变化表明,敞口空气暴露过程中可能伴随 CO_2 逸散、碳酸盐平衡迁移、难溶盐沉淀生成及颗粒失稳团聚,从而促进盐—颗粒复合悬浮体形成。

(2)动态沉积实验表明,6种管材表面单位面积沉积量均随时间延长而增加,具有明显的时间累积特征。144 h时,沉积量由高到低依次为:钢骨架管>碳钢片>塑料合金管>玻璃钢管>PP管>柔性复合管,其中钢骨架管最高,为 $7855.78\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,柔性复合管最低,为 $2879.63\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。XRD、SEM-EDS和CT结果表明,沉积物中存在明显的NaCl相关晶

相信号、Na/Cl及Si/O富集区,并具有孔隙与局部致密区共存的非均质结构。综合来看,沉积物呈现盐分富集、颗粒团聚和多组分复合累积特征,其沉积程度受管材粗糙度、润湿性及表面化学性质等共同影响,其中较高粗糙度有利于颗粒截留和机械嵌合。

(3)工程应用上,该区块采出液管壁沉积并非单一盐垢沉积过程,而是受敞口空气暴露诱导的水化学变化、颗粒失稳、盐分富集、难溶盐沉淀及管材表面性质共同控制的盐—颗粒复合沉积过程。该过程可导致沉积物在管壁持续累积,并具有进一步诱发现场管道堵塞的潜在风险。饱和指数分析显示,Calcite和Aragonite在曝氧初期具有一定沉淀倾向,而Halite整体处于未饱和状态,说明沉积物中的NaCl相关信号可能受到局部浓缩、沉积层夹带高盐液相及样品干燥析晶等因素影响,不宜直接等同于现场流动环境下形成的稳定不可逆NaCl固相沉积。因此,现场应从降低敞口曝氧程度、控制悬浮颗粒、减少局部浓缩和优选低沉积倾向管材等方面开展沉积控制与潜在堵塞风险防控。

参考文献

- [1] Amakiri K T, Canon A R, Molinari M, et al. Review of oilfield produced water treatment technologies[J]. *Chemosphere*, 2022, **298**: 134064.
- [2] Cooper C M, McCall J, Stokes S C, et al. Oil and gas produced water reuse: opportunities, treatment needs, and challenges[J]. *ACS ES&T Engineering*, 2022, **2**(3): 347–366.
- [3] 李清方,刘中良,庞会中,等.基于机械蒸汽压缩蒸发的油田污水脱盐系统分析[J]. *化工学报*, 2011, **62**(7): 1963–1969.
Li Q F, Liu Z L, Pang H Z, et al. Process simulation and analysis of mechanical vapor compression based oilfield waste water desalination systems[J]. *Ciesc Journal*, 2011, **62**(7): 1963–1969.
- [4] 曹立虎,江同文,潘昭才,等.塔里木盆地库车山前超深气井砂垢堵塞成因及靶向解除技术[J]. *天然气工业*, 2024, **44**(8): 85–94.
Cao L H, Jiang T W, Pan Z C, et al. Formation mechanism and targeted descaling technology of sand-scale composites in ultra-deep gas wells in the Kuqa piedmont of the Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, **44**(8): 85–94.
- [5] 江同文,孟祥娟,黄锬,等.克深2气田井筒堵塞机理及解堵工艺[J]. *石油钻采工艺*, 2020, **42**(5): 657–661.
Jiang T W, Meng X J, Huang K, et al. Well blockage mechanism and blockage removal technology in Keshen 2 Gas Field[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, **42**(5): 657–661.
- [6] 韩巧云,杨晓杰,邹声华.深井降温系统管道结垢微观机理[J]. *化工学报*, 2016, **67**(9): 3936–3945.
Han Q Y, Yang X J, Zou S H. Micro-mechanism of scaling in a cooling system under deep mine[J]. *CIESC Journal*, 2016, **67**(9): 3936–3945.

- [7] 刘钲凯, 邱正松, 李佳, 等. 陵水 25-1 深水气田结垢预测与防治研究[J]. 钻井液与完井液, 2022, **39**(1): 126-132.
Liu Z K, Qiu Z S, Li J, et al. Experimental research on prediction and prevention of scaling in Lingshui 25-1 gas reservoir[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022, **39**(1): 126-132.
- [8] 邓志诚, 许世峰, 王洪冬, 等. 浸没燃烧处理高盐高化学需氧量废水过程与能耗分析[J]. 化工学报, 2024, **75**(3): 1000-1008.
Deng Z C, Xu S F, Wang Q D, et al. Process and energy consumption analysis of high salt and high COD wastewater treatment by submerged combustion[J]. CIESC Journal, 2024, **75**(3): 1000-1008.
- [9] 吴文明, 侯吉瑞. 新疆某油田油井堵塞物成分及成因分析[J]. 油田化学, 2022, **39**(2): 349-354.
Wu W M, Hou J R. Analysis on components and origin of the well blockage in one Xinjiang Oilfield[J]. Oilfield Chemistry, 2022, **39**(2): 349-354.
- [10] Kamal M S, Hussein I, Mahmoud M, et al. Oilfield scale formation and chemical removal: a review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, **171**: 127-139.
- [11] Kumar S, Naiya T K, Kumar T. Developments in oilfield scale handling towards green technology—a review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, **169**: 428-444.
- [12] Yan Y, Tao Y, Huan Z, et al. Co-Deposition Mechanisms of Calcium Sulfate and Calcium Carbonate Scale in Produced Water [J]. Crystals. 2021, Vol.11(No.12): 1494.
- [13] Valadbeygian V, Hajipour M, Behnood M. Static and dynamic evaluation of formation damage due to barium sulfate scale during water injection in carbonate reservoirs[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2023, **13**(8): 1819-1831.
- [14] Rafiee H, Sorbie K S, MacKay E J. The deposition kinetics of barium sulphate scale: model development[J]. Frontiers in Materials, 2023, **10**: 1198176.
- [15] Pochapski D J, Carvalho Dos Santos C, Leite G W, et al. Zeta potential and colloidal stability predictions for inorganic nanoparticle dispersions: effects of experimental conditions and electrokinetic models on the interpretation of results[J]. Langmuir, 2021, **37**(45): 13379-13389.
- [16] Daneshfar R, Soltani Soulgani B, Ashoori S. Identifying the mechanisms behind the stability of silica nano- and micro-particles: Effects of particle size, electrolyte concentration and type of ionic species[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, **397**: 124059.
- [17] Awan F U R, Arif M, Iglaier S, et al. Coal fines migration: a holistic review of influencing factors[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2022, **301**: 102595.
- [18] Awan F U R, Keshavarz A, Akhondzadeh H, et al. Stable dispersion of coal fines during hydraulic fracturing flowback in coal seam gas reservoirs: an experimental study[J]. Energy & Fuels, 2020, **34**(5): 5566-5577.
- [19] Lin R, Huang Y J, Zhao J Z, et al. Coupled CFD-DEM modeling of fine particles and fibers migration and clogging mechanisms in bridging regions[J]. Computers and Geotechnics, 2026, **189**: 107647.
- [20] Moriconi L, Nascimento T, de Souza B G B, et al. Top-down model of calcium carbonate scale formation in turbulent pipe flows [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, **28**: 101141.
- [21] Gong L, Wu F Y, Pan M F, et al. Exploring the mechanisms of calcium carbonate deposition on various substrates with implications for effective anti-scaling material selection[J]. Petroleum Science, 2024, **21**(4): 2870-2880.
- [22] Vazirian M M, Charpentier T V J, de Oliveira Penna M, et al. Surface inorganic scale formation in oil and gas industry: as adhesion and deposition processes[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, **137**: 22-32.
- [23] 韩志敏, 周相宇, 张宏宇, 等. 不同粗糙元结构下 CaCO_3 污垢局部沉积特性[J]. 化工学报, 2025, **76**(1): 151-160.
Han Z M, Zhou X Y, Zhang H Y, et al. Local deposition characteristics of CaCO_3 fouling under different roughness element structures[J]. CIESC Journal, 2025, **76**(1): 151-160.
- [24] SY/T 5523-2025. 油田水分析方法 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2026.
SY/T 5523-2025. Analysis method for oil and gas field water [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2026.
- [25] SY/T 6662.1-2022. 石油天然气工业用非金属复合管 第1部分: 钢骨架增强聚乙烯复合管 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
SY/T 6662.1-2022. Non-metallic composite pipe for petroleum and natural gas industries -Part 1: Steel skeleton reinforced polythene composite pipes [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [26] SY/T 6662.2-2020. 石油天然气工业用非金属复合管 第2部分: 柔性复合高压输送管 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2021.
SY/T 6662.2-2020. Non-metallic composite pipe for petroleum and natural gas industries Part 2: Flexible composite pipe for high pressure transmission [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.
- [27] 张劲军, 黄启玉, 严大凡. 管输剪切模拟搅拌槽中流体平均剪切率的计算[J]. 石油学报, 2003, **24**(2): 94-96, 100.
Zhang J J, Huang Q Y, Yan D F. Estimation of average shear rate in stirred vessels for pipelining shear simulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, **24**(2): 94-96, 100.
- [28] Metzner A B, Otto R E. Agitation of non-Newtonian fluids[J]. AIChE Journal, 1957, **3**(1): 3-10.
- [29] Wang H N, Duan X X, Feng X, et al. Effect of impeller type and scale-up on spatial distribution of shear rate in a stirred tank[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022, **42**: 351-363.
- [30] Parkhurst D. L., Appelo C. A. J.. Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3: A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. [R]. Reston, VA: U. S. Geological Survey, 2013.